

# 自動車交通システムのための人工免疫におけるイディオタイプネットワークの生成及び協調危険度抑制に関する研究

Study on Cooperative Risk Mitigation and Emergence of Idiotype Network in Artificial Immune System for Vehicle Transportation

電気電子情報通信工学専攻 菊池 亮平  
Ryohei Kikuchi

## 1 緒言

自動車は現代社会において、21 世紀においても尚、人々を支える基盤として必要不可欠なものである。しかし、「交通事故」「渋滞」「汚染」といった負の側面が顕著化し、大きな社会問題となっている。これに対し、様々な対策がなされている、中でも、起こった事故に対処するのではなく、事故を未然に防ぐ予防安全技術が注目されている。これまでの研究開発においては、単一の車両における障害物回避や、道路インフラとの協調による運転支援、自動運転などが考えられてきたが、今後は、複数の車両が錯綜する、より複雑な状況下での運転支援システムが求められるが、複数の車両錯綜状況下における支援や動的挙動の制御は未だに困難が多い [1]。また、複数車両の塊である車群についても渋滞や事故の原因となるものとして問題となっている。本研究では免疫型交通システムの 3 大要素である「危険度評価システム」「ネットワーク生成システム」「回避行動生成システム」について検証し、車群制御システムについて提案する。

## 2 生体免疫システムと危険抑制システム

本システムにおいて、一度車両が錯綜する状態に陥ると、車両同士が協調し錯綜回避を開始する形とする。複雑かつ動的な交通環境下において、ロバストかつ柔軟に対処できるシステム構築のために、本研究では生体の情報処理機構である免疫システムシステム

### 自己存続に特化したシステム

変動していく環境の中でいかに自己を存続させていくかというシステム

### 分散型のシステム

部分的な活性状態の伝播がシステムレベルの認識を可能にする分散型のシステム

という特徴に着目し、導入を検討してきた。免疫システムでは各要素は他と相殺し合いながら危険因子及び全体的な危険性の中和を行う。すなわち、fig.1 左側に示す様に危険因子に対応したある要素の反応は、周囲から見た場合元々の危険因子と共に新たな危険因子となり、それに別の要素に対応する事を繰り返す、最終的な中和状態にいたる。この点において、多種の車両が存在する交通流において他車両との錯綜回避が新たな危険を生み、それに周囲が協調、危険抑制を行うと言った流れに極めて近いスキームを見出すことができる (fig.1 参照)。実際に人の免疫システムは、侵入してきた異物 (抗原) に対し、生産される様々な抗体が連携して抗原を中和する仕組みである。免疫応答は自然免疫と獲得免疫の 2 段階に分けられる。まず自然免疫が働き抗原に対応、その際の情報に基づき獲得免疫がより精密な対応を行う。提案システムでは、これらは情報収集による道路インフラ側の対応 (自然免疫) と危険事象

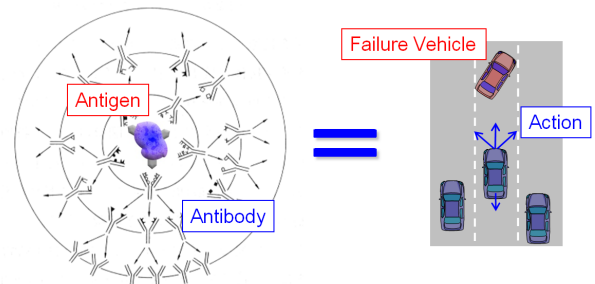


Fig 1: Immune Network to Cooperation System

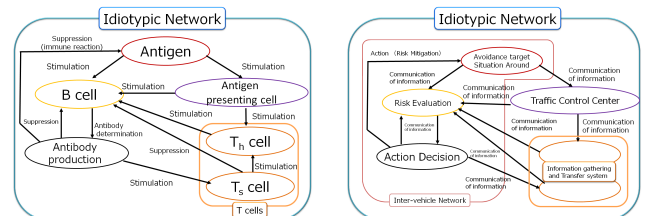


Fig 2: Configuration of Immune System Fig 3: Modeling Cooperation System

近傍に存在する車両における反射的対応 (獲得免疫) としてモデル化されている。ここでイディオタイプネットワーク説では、抗体による過剰反応を抑制するため、免疫システムでは互いに刺激・抑制関係を維持する [2] [3]。提案システムにおいては、危険車両を認識した時に車両が止まってしまうないように (刺激) をして円滑な走行を促し、また、逆に過剰な反応を示し、加速しすぎないように (抑制) 走行に必要な要素はモデル化されている。したがってこれらは車群においては自己回避に重要な危険回避行動を取る上で有用なシステムであることが言える。なお提案システムでは、各車両の行動を抗体として定義し、その行動も免疫ネットワークを用いて決定して行く。以上の検討を用いて fig.2 の生体免疫システムを交通システムにあてはめた場合、fig.3 に示すように抗原は危険車両、抗原に対処する抗体は車両、それら抗体に情報を伝える自然免疫システムはインフラシステムとなる。

## 3 協調システムのモデル化

### 3.1 危険度評価

本研究では他車両から受ける危険度をポテンシャル場を用いてモデル化する。具体的には各車両に電荷を配置することで電界を仮想的に発生させ、そのポテンシャル場で表現する。任意状況の任意の地点のポテンシャル  $U$  は eq1 により算出される。

$$U = \int \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{r_i^2} \quad (1)$$

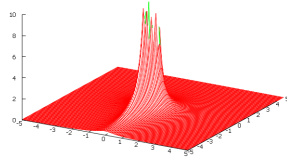


Fig 4: State of risk

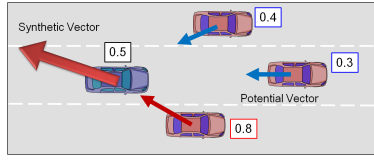


Fig 5: Create of Synthetic Vector

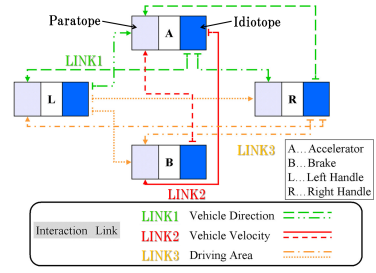


Fig 6: Evasive Action Generation

(n:周辺車両数, p:電荷, r:その車両からの距離) また車両の運動特性により前後左右で危険度が異なると推測してポテンシャル場を歪ませることを考える. これは車両後方と前方であるならば前方がより危険と感じられるからである. また, このようにして側方においても危険は少ないと考えることができる. これは, 人間におけるパーソナルスペースが車両にも適用できると考えたためである. 最終的に生成される危険領域は fig.4 の様になる.

### 3.2 ネットワーク生成

危険を認識し実際に回避行動を取るとして, どの車両を回避し, どの車両と連携すべきなのかを考える必要がある. 連携すべき車両を選定するためにここでは免疫システムの動的関係ネットワークを用いる. このシステムはすべての車両が車両間でお互いを信用できる・出来ないを判断しそれらの投票結果を加算していくことにより各車両の信用度が決定される. 以下にこの手法をモデル化したものを, eq.2 に示す.

$$dr_i(t)/dt =$$

$$\sum_j (T_{ji}R_j(t) + T_{ij}R_j(t)) - \frac{1}{2} \sum_i (T_{ij} + 1) \quad (2)$$

$$R_i(t) = 1/1 + \exp(-r_i(t)) \quad (3)$$

ここで  $T_{ij}$  は  $i$  が  $j$  をテストした結果であり,  $R_i$  が  $i$  の信用度となる. このときのテスト結果  $T$  は危険度評価の  $U$  をテスト結果として入力する. この信用度  $R$  の値により自分より信用できない車両を優先的に回避していく.

### 3.3 回避行動生成

免疫型のネットワークのモデル化により回避行動選択機構を構築する. 各回避操作を免疫システムにおける抗体と同じ形で記述する. 実現のために免疫型のイデオタイプネットワークモデルを用いる [4].

今回定義した回避行動はアクセル, ブレーキ, 右ハンドル, 左ハンドルの基本的な 4 つの操作の組み合わせで行われる. 定義した要素行動群 (抗体群) と状況認識により, Fig6 のような抗体間に刺激・抑制関係のネットワークを作る.

このネットワーク関係から, 道路状況, 車両の状態に応じて各抗体の活性度を遷移させていく. 刺激・抑制リンクを持つ免疫型のネットワークモデルによる行動選択機構の抗体 (行動) の活性度  $a_i$  は式 (4), (5) のような一階の微分方程式によって決定される. この  $A_i(t)$  を積分することによって, 抗体 (行動) の活性度  $a_i$  は算出される. そしてこの抗体活性度が行動の優先度となり車両の行動が決定される.

$$dA_i(t)/dt =$$

$$\left( \sum_{j=1}^4 m_{ji}a_j(t) - \sum_{k=1}^4 m_{ik}a_k(t) + k_i(t) \right) a_i(t) \quad (4)$$

$$a_i(t+1) = 1/1 + \exp(0.5 - A_i(t)) \quad (5)$$

$m_{ji}, m_{ik}$  は抗体間のリンクの重み,  $k_i(t)$  は抗原親和度 (外的要因値) である. 抗原親和度 (外的要因値)  $k_i(t)$  は, 合成ベクトルにおけるポテンシャル値を進行方向と横方向に分解し (進行方向)  $= k_A(t)$ ,  $k_B(t)$ , (横方向)  $= k_R(t), k_L(t)$  とそれぞれを定義する. この斥力ポテンシャル値のベクトルの算出を, 周辺車両すべてに対して行い, 前述の危険度評価より自車両より危険度が高い車両に重みを置き合成ベクトルを生成する (Fig5). これにより各抗体の初期値と外的要因の入力値を決定する.

### 3.4 車両群制御への拡張

ここまでの協調回避システムの適応範囲は車両間のみモデル化を行ってきた. 突発的に起きる事故の回避などは, 範囲が限定される事象であり, 従来通り車両間のみの協調で回避することが可能であると考えられる. しかし今後, この協調回避システムにおいて事故回避だけではなく, 複数車両の錯綜によって発生する渋滞などを回避を行うためには, 複数の車両をまとめて考えた「車群」においてシステムの適応を考える必要もある. 「車群」をどう扱うべきかという問題は, 大変難しい問題でもある. そこで, ここでは前項で免疫ネットワークを用いてモデル化を行った車両同士の協調回避システムを, さらに車群同士に拡張する形で適用することで, 交通流の円滑性向上に貢献できないかを検討する.

車群間の協調方法は, 車両間の協調方法と同じく車群間にポテンシャル場による危険度  $L_{ij}$  を元にして行うものとする. この車群の危険度  $L_{ij}$  は, 下記のように定義する.

$$L_{ij} = \frac{P_i}{R_{ij}} \quad (6)$$

$P$ : 電荷  $R$ : 車群間の相対距離

この車群の危険度から, 周囲の協調する車群の信頼度  $G_i(t)$  を算出する. その算出の方法は車両間協調のモデル化と同じく免疫ネットワークにおける動的関係ネットワークを用いて, 下記のように算出する.

$$\frac{dg_i(t)}{dt} = \sum_j L_{ji}G_j + \sum_j L_{ij}G_j - \frac{1}{2} \sum_j (G_j + 1) \quad (7)$$

$$G_j = \frac{1}{1 + \exp(0.5 - g_i(t))} \quad (8)$$

車群における協調回避システムの制御は, 後続車両の車

群に対して、回避の余裕を与えるために行うことを前提とするため、前後方向の操作に限定を行う。よって協調車群が前方にある場合では、それを回避するように減速制御を行い、後続に車群がある場合には加速制御を行う。最後に車両間協調との調停を行うために、車群協調を含めた形の各回避行動の活性度は下記のように決定する。

$$\frac{dA_{gi}(t)}{dt} = \left( \sum_{j=1}^4 (m_{ji} - m_{ij}) a_j(t) + k_r R_i(t) + k_g G_i(t) \right) a_i(t) \quad (9)$$

$$a_{gi}(t) = \frac{1}{1 + \exp(0.5 - A_{gi}(t))} \quad (10)$$

## 4 システムの検証

### 4.1 シミュレーション内容

今回の目的は免疫型交通システムの各要素を個別に検証し正常に動作するかどうかの検証、それら各要素を組み合わせた総合検証、そして車群へ応用検証である。まず各要素を専用のシミュレータにて検証し、次に総合検証として交通シミュレータ KAKUMO を利用した検証をする。最後に車群についての検証を行う。

### 4.2 個別検証

まず、個別のシステムである (1) 危険度評価システム (2) ネットワーク生成システム (3) 回避行動システムについて各々検証していく。

#### 4.2.1 危険度評価システム

実際の交通を模した状況を再現し危険を認識できているかを検証する。fig.7 に後方からの衝突車両, fig.8 に割り込み車両, fig.9 に三台が横並びになった時の危険度の違いについて検証する。

fig.7 において後方からの車両に対して指数的に増加する危険を認識している。これにより後方からの異常接近してくる車両について認識が可能といえる。次に, fig.8 において他車両が割り込もうとしている位置に近づくに連れて危険が増加しているのがわかる。そして他車両の進行方向において危険が最大になっている。これにより割り込み車両による危険を認識が可能と言える。最後に、三台の横並び車両の危険度の様子を fig.9 に示す。このとき、それぞれが受ける危険度が両端の車両が 4.16666, 中央の車両が 6.66666 となった。この時中央の車両が最も危険を感じている。これは中央の車両が両端の車両に比べて取れる行動範囲が狭いため、危険を感じていると考えられる。この検証から、自分が置かれた立場から危険を認識しているといえる。

#### 4.2.2 ネットワーク生成システム

ランダムで生成された状況について検証していくとともに、危険度評価システムと同様、実際の交通を模した状況についてネットワークが張られているか検証する。

まず、3~200 台の車両がランダムに配置された状況において、各台数 5000 パターンを危険度が最も高いものが最も信用出来ない車両として認識できているかを検証する。結果すべてのパターンにおいて認識が確認された。次に fig.10

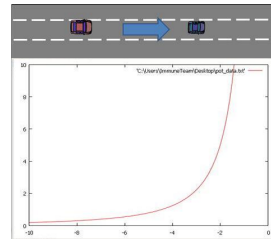


Fig 7: Risk Of Collision Car

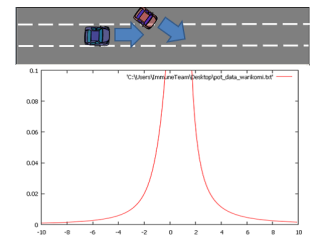


Fig 8: Risk of unsafe lane change car

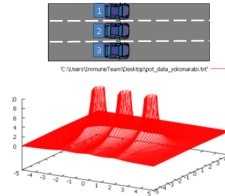


Fig 9: Risk of side-by-side three cars

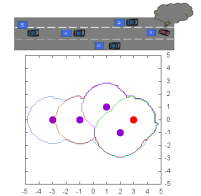


Fig 10: State of the formation of the network

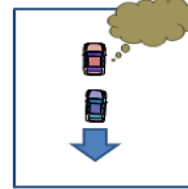


Fig 11: State of avoidance behavior

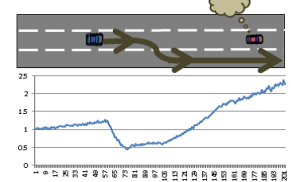


Fig 12: State of the risk of avoidance behavior

に検証状況と、その際生成されたネットワークを可視化したものを示す。危険車両を中心にネットワークが張られていく様が見て取れる。これによりネットワークの生成の有用性が示された。

#### 4.2.3 回避行動生成システム

簡単な状況において危険の少ない方向へ行動するかどうかを検証し、実際に走行させ危険車両を回避できるかを検証する。fig.11 のような、前方に危険がある場合において、行動は後方の、現在地よりも危険の少ない方向へ決定された。これにより、行動決定により危険の少ない方向へ行動がなされることが示された。次に危険車両の存在する走行における危険度の推移を見ていく。車両の状況と危険度推移を fig.12 に示す。危険車両に対して走行しているため危険を下げ続けるのは不可能である。この場合の推移を見ると、車線変更ポイントにおいて危険度が減少している。その後危険度が横ばいになるよう行動しているのが見て取れる。危険車両に接近しつつも危険度を減少、または横ばいになるよう行動をとっていることから、適切な回避行動がなされていること示された。

### 4.3 総合検証

総合検証では車両三台を横並びに配置し、前方に十分な距離を持った場所にある危険車両に対して回避行動が取れるか、またその時の行動決定が適切に動いていたのかを危険度を通して検証する。状況と走行経路を fig.13 に示す。結果として危険車両を回避することに成功した。次に各行動パラメータと危険度の遷移について検証する。

fig.14 にアクセルとブレーキの活性度, fig.15 に右ハンドルとブレーキの活性度を示す。

まず, fig.14 において危険車両の影響により、ブレーキをかけていることがわかる。その時右ハンドルの活性度が左ハ



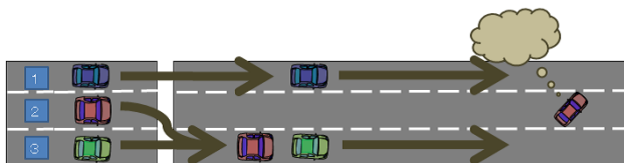


Fig 13: Comprehensive test of three cars

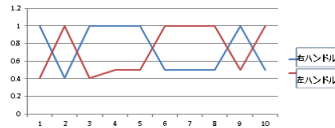
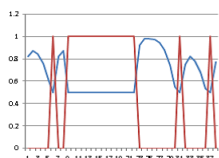


Fig 14: Activity of accel and Fig 15: Activity of left and right brake

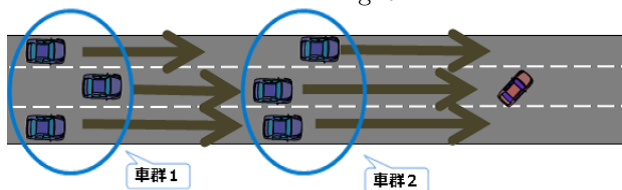


Fig 16: Vehicle situation of car group control

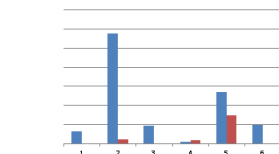
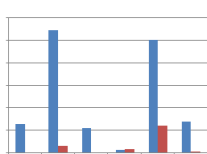


Fig 17: The average value Fig 18: The maximum value of risk in the vehicle group control of graph

ハンドルを抑制することにより右方向へ回避行動を取る。その後、車線変更後に車線に対して平行になるように左ハンドルが右ハンドルを抑制した。

車線変更後、下がりすぎた速度を適正值へ戻すためにアクセルがブレーキを抑制し、速度を元に戻しているのが見て取れる。この一連の行動決定は危険車両を回避するためにブレーキをかけ、他の車両へ移ったと解釈でき、他の車両と連携し危険を回避したといえる。

次に危険度の遷移について検証する。危険度の遷移は fig.19 の様になった。3番の車両が背後に回りこまれた際、危険度が増加しているがその後すぐに減少している。これは危険を抑制しようとして行動した結果であるといえる。この時 fig.14 をみると、アクセルがブレーキを抑制してなおブレーキがスパイク状に優位に立っているのが見える。これは、3番の車両を考慮し行動した結果であるといえる。この検証により、危険度を下げる方向に行動し、かつ他車両を考慮し行動していることが示された。

#### 4.4 車群検証

提案する車群について、制御により危険が抑制されたか、また、危険の最大値がどのようになったかを検証することにより各々の車両が安全に運行できたのかを検証する。車両の初期状況を fig.16 に示す。前の車群番号を1、後ろの車群番号を2とし、車群1の上から車両番号を1、2、3とし車群2も同様に上から4、5、6とする。シミュレーションの結果、どちらも事故を起こすことなく安全に走行を終了

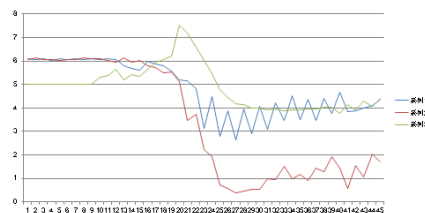


Fig 19: Risk of comprehensive test of threes

Table 1: The average value of risk in the vehicle group control

車両番号	1	2	3	4	5	6
車群制御なし	255.0077	1085.899	223.241	29.77088	1001.755	275.4806
車群制御あり	0.051175	60.99484	0.911905	32.9293	243.1108	8.906635

Table 2: The max value of risk in the vehicle group control

車両番号	1	2	3	4	5	6
車群制御なし	31940.75	287020.5	48043.47	5531.998	134910.9	49241.07
車群制御あり	0.654	12859.89	23.992	9030.317	73572.5	639.804

した。この時の危険度の平均値を table.1 に、各車両の危険度の平均値の比較を fig.17 に示す。4番の車両を除き平均値は大きく減少している。次に最大値を table.4.4 に、各車両の比較を fig.18 に示す。この比較もまた4版の車両を除き減少の傾向にある。これは車群制御がない場合車群2が車群1と合流してしまい、車両密度が高くなり危険が上昇したためである。車群制御をかけた場合、車群同士が衝突しなかったため、危険度が著しく上昇することはなかった。

## 5 結言

本研究は車両同士の協調回避システムを免疫型のネットワーク機構をモデル化することによって構築することを検討した。今回は免疫型交通システムの3大要素である「危険度評価システム」「ネットワーク生成システム」「行動決定システム」を個別に検証、統合し、車群への応用を検討した。今後の課題はよりロバストに動作するシステムの構築である。そのためには免疫系の重要な要素である記憶機能や各パラメータの検証が必要であると考えられる。

## 参考文献

- [1] 鈴木高宏:車線変更による混在交通流の動的挙動の制御, 自動車技術会春季大会 2001 学術講演会前刷集 No.117-01,pp31-34,2001
- [2] 矢田 純一 免疫一からだを護る不思議なしくみ東京化学同人 第4版
- [3] Jerne,N.K. The Immune System, Sci.Amer.,229,1,pp.52-60,1973
- [4] 石田好輝編: 免疫型システムとその応用-免疫学に学んだ知能システム-, コロナ社,1998
- [5] Li Xuemei, Kam-Cheung Kwong, Li Jincheng, Jiang Liangzhong, Zeng Dehuai2Mobile Robot Path Planning Based on Artificial Immune Algorithm,2009 IEEE